

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга

На правах рукописи



**Петров Владислав Сергеевич**

**ПАРАМЕТРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ  
ДВОЙНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ  
ЭФФЕКТОВ ВЗАИМНОЙ БЛИЗОСТИ  
КОМПОНЕНТОВ**

Специальность 01.03.02 —  
«астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в отделе звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга ФГБОУ ВПО Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: **Черепашук Анатолий Михайлович**  
доктор физико-математических наук, академик РАН, директор Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга ФГБОУ ВПО Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Лутовинов Александр Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор РАН,  
старший научный сотрудник ФГБУН Института космических исследований РАН

**Машонкина Людмила Ивановна**,  
доктор физико-математических наук,  
заведующая отделом нестационарных звёзд и звёздной спектроскопии ФГБУН Институт астрономии РАН

Ведущая организация: ФГАОУ Казанский (Приволжский) федеральный университет

Защита состоится 16 марта 2017 на заседании диссертационного совета Д501.001.86 на базе Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга по адресу: Университетский проспект, дом 13, 119991, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научная библиотека Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова ..

Автореферат разослан 13 октября 2016.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д501.001.86 , д-р физ.-мат. наук



Алексеев Станислав Олегович

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы.

Рентгеновские двойные системы - это самые разнообразные и изменчивые объекты, известные астрономам. Точное определение масс компактных объектов в рентгеновских двойных системах до сих пор остается одной из актуальных задач современной астрофизики.

Верхняя граница масс нейтронных звезд на сегодняшний день надежно определена и составляет  $\sim 3 M_{\odot}$  (см., например, [1]). Бэйлин и др. [2] и Черепашук [3] показали, что распределение масс черных дыр для семи маломассивных рентгеновских двойных систем достигает максимума вблизи  $7 M_{\odot}$ . Интервал масс между  $3 M_{\odot}$  и  $7 M_{\odot}$  в получившемся бимодальном распределении стали называть “провалом масс”. Этот эффект был подробно исследован Озелом и др. [4], а также Фарром и др. [5]. Для интерпретации этого феномена было предложено несколько теорий эволюции рентгеновских двойных систем или модифицированных моделей взрыва сверхновых (см. [6, 7, 8]). Крейдберг и др. [9] показали, что “провал масс” может быть просто результатом систематических ошибок при определении углов наклона орбит рентгеновских двойных систем и следовательно, масс черных дыр.

Отдельно отмечается, что число массивных звезд в Галактике возрастает с уменьшением массы как  $M^{-5}$ . В то же время спектр масс черных дыр, рассчитанный в модели оптического спутника как плоского диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения диска к краю [5, 10], практически не возрастает с уменьшением массы черной дыры.

Результаты современного популяционного моделирования маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами в стандартных предположениях имеют сильное расхождение с наблюдаемыми данными [11]. Помимо наличия “провала масс” и плоского спектра масс самих черных дыр [4, 5, 10] наблюдается несоответствие между моделируемым и наблюдаемым распределениями масс оптических компонентов в таких системах.

Таким образом, несмотря на то что современная астрономическая техника позволяет получать оптические спектры и кривые лучевых скоростей с высокой точностью, правильная интерпретация этих данных до сих пор остается трудной задачей. Наблюдаемые профили линий поглощения оптической звезды и кривые лучевых скоростей имеют систематические искажения за

счет приливного взаимодействия, рентгеновского прогрева, гравитационного потемнения и т.д. Однако часто наблюдаемую кривую лучевых скоростей анализируют в модели двух точечных масс, а в случае модели оптической звезды, имеющей ненулевые размеры, предполагается, что профиль линии постоянен по диску звезды, а форма кривой лучевых скоростей не зависит от эффектов близости компонентов.

Впервые вопрос о влиянии несферичности звезды в двойной системе на кривую лучевых скоростей был рассмотрен Стерном [12] еще в 1941 году. Автор исследовал приливную деформацию звезды в спектроскопических двойных системах как источник ложных эксцентриситетов. Позднее аналитические формулы для поправок к лучевым скоростям вывели Копал и Китамура [13, 14, 15]. Хатчингс [16] впервые учёл влияние приливной деформации звезды при расчете методами синтеза профилей линий и кривых лучевых скоростей звезд. Рассматривались сферическая звезда и звезда в модели Роша. В качестве локальных профилей элементарных площадок были взяты либо теоретические профили в простейшем виде (профили Гаусса), либо наблюдаемые профили из библиотеки стандартных профилей, без учета вращения звезд. Этот метод был применен к нескольким массивным рентгеновским двойным системам и позволил оценить их параметры. Вилсон и София [17] предложили способ прямого вычисления кривых лучевых скоростей методом синтеза (аналогично методу Вилсона и Девинея [18]). Авторы отметили, что сильные отклонения от модели материальных точек возникают при максимальном заполнении звездой своей полости Роша и при экстремально малых значениях отношения масс  $q$  в системе (звезда имеет значительно большую массу, чем компактный объект). Оба признака характерны для массивных рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами.

Антохина и Черепашук [19] предложили алгоритм вычисления профилей линий и кривых лучевых скоростей приливо-деформированных звезд в тесных двойных системах (ТДС) методом синтеза. Звезды рассматривались в модели Роша, орбиты могут быть круговыми или эллиптическими. В качестве локальных профилей линий элементарных площадок использовались приведенные в работе Куруца [20] теоретические профили водородных линий для различных значений эффективных температур и ускорений силы тяжести. Позднее Антохина и др. [21] усовершенствовали алгоритм синтеза

профилей линий и кривых лучевых скоростей звезд в рентгеновских ТДС. Основное отличие от предыдущей версии алгоритма состоит в способе вычисления профилей линий локальных площадок и учете рентгеновского прогрева. Оптическая звезда рассматривается в модели Роша. Прогрев поверхности звезды падающим рентгеновским излучением от релятивистского объекта и вычисление выходящего излучения осуществляется путем решения уравнения переноса в данной точке атмосферы звезды. Новый алгоритм позволяет более корректно учитывать рентгеновский прогрев звезды спутником и интерпретировать спектроскопические наблюдения ТДС.

Перечисленные выше методы позволяют напрямую вычислять профили линий и кривые лучевых скоростей звезд в ТДС в рамках сложных моделей.

Вэйд и Хорн [22] ввели понятие К-поправки, как поправки, связанной с различием между лучевыми скоростями центра масс звезды и “эффективного центра” области формирования спектральных линий. Рассчитанные таблицы К-поправок дают возможность корректировать полуамплитуды кривых лучевых скоростей звезд в модели материальных точек.

Эффекты взаимодействия компонентов ТДС могут вызывать орбитальную переменность профилей линий поглощения оптической звезды и неоднозначность их интерпретации в рамках принятой аппроксимации фигуры звезды. Для определения отношения масс  $q$  в маломассивных рентгеновских двойных системах часто используют информацию о вращательном уширении абсорбционных линий в спектре звезды позднего спектрального класса. Эффекты взаимодействия компонентов ТДС также могут вызывать орбитальную переменность профилей линий поглощения оптической звезды.

Вопрос о систематических погрешностях при определении отношения масс  $q$  по вращательному уширению линий звезды в конкретных маломассивных рентгеновских системах с черными дырами исследовали в своих работах Марш и др. [23] (для A0620-00) и Шабаз [24] (для Nova Sco 1994). Марш и др. [23] показали, что при определении отношения масс  $q$  для рентгеновской двойной системы A0620-00 по вращательному уширению линий погрешности аппроксимации приливно-деформированной звезды равнообъемной сферой не превышают 5%. Оптическая звезда в рентгеновской двойной системе A0620-00 рассматривалась авторами [23] в модели Роша. Однако модельные

профили линий вычислялись без решения уравнений переноса в атмосфере звезды, что, по признанию самих авторов [23], было существенным недостатком.

Шабаз [24] предложил модель для определения отношения масс в маломассивных ТДС методом аппроксимации наблюдаемого спектра оптической звезды синтетическим спектром и выполнил оценку отношения масс компонентов для Nova Sco 1994 (звезда в системе имеет спектральный класс F). Оптическая звезда рассматривалась в модели Роша, параметры модели варьировались в заданном диапазоне. Для вычисления синтетических спектров в диапазоне 6300-6800 Å автор использовал расчеты моделей атмосфер NextGen для холодных звезд, затем в спектры было внесено межзвездное покраснение. Синтетические спектры вычислялись для одной фазы орбитального периода  $\phi = 0.35$ . Далее рассчитанные спектры уширялись вращением, и методом кросс-корреляции с наблюдаемым спектром определялась скорость вращения звезды. Автор отмечает, что метод прямого вычисления спектра и определения скорости вращения звезды имеет преимущества по сравнению с моделью классического вращательного уширения (звезда аппроксимируется плоским круглым диском с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения диска к краю)[25], так как не требуется информация о законе потемнения к краю и устраняются неопределенности, связанные с этим.

В работе Антохиной и Черепашука [26] было исследовано влияние аппроксимации формы звезды, заполняющей свою полость Роша на значение отношения масс компонентов рентгеновской двойной системы, определенное по вращательному уширению линии поглощения. Было получено, что учет реальной формы звезды приводит к переоценке отношения масс  $q = M_x/M_v$ .

Все это определяет актуальность темы диссертации, посвященной исследованию эффектов близости компонентов в рентгеновских двойных системах и разработке методов, позволяющих в первом приближении учесть эффекты близости компонентов без прямого вычисления кривых лучевых скоростей в сложных моделях (например, в модели Роша, модели быстро вращающейся звезды и пр.).

**Целью** данной работы является:

1. Построение таблиц К-поправок на основе прямых расчетов теоретических

кривых лучевых скоростей звезд для диапазона параметров, характерных для рентгеновских двойных систем в широком диапазоне масс оптических компонентов и рентгеновского прогрева ( $k_x = 0 - 10$ ). Использование таблиц К-поправок позволит учитывать для полуамплитуды кривой лучевых скоростей систематические искажения за счет приливного взаимодействия компонентов двойной системы, рентгеновского прогрева, гравитационного потемнения и т.д. без прямого расчета кривых лучевых скоростей звезд в ТДС в рамках сложных моделей.

2. Исследования влияния замены реальной приливо-деформированной формы звезды равнообъемной сферой или диском с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю на определение отношения масс  $q$ . Получение аппроксимирующих формул, которые связывают поправки  $\Delta q$  с приближенными значениями отношений масс  $q$ .

3. Получение аппроксимирующих формул, которые связывают величину вращательного уширения линий поглощения в спектре оптической звезды с величиной отношения масс  $q = M_x/M_v$  при различной мощности рентгеновского прогрева  $k_x$  на основании точных расчетов профиля линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$  в спектре оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы.

4. Построение таблиц К-поправок для оптических звезд и уточнение оценок на их основании масс компактных объектов в массивных рентгеновских двойных системах Cen X-3, LMC X-4, SMC X-1, Vela X-1, 4U 1538-52.

5. Уточнения оценки масс оптических компонентов и черных дыр в 9 рентгеновских новых с черными дырам по приведенной методике. Моделирование нового общего распределения масс оптических компонентов и черных дыр в этих системах. Использование методов непараметрической статистики для определения параметров и устойчивости суммарного распределения масс черных дыр.

### Задачи:

1. Построить таблицы К-поправок на основе прямых расчетов теоретических кривых лучевых скоростей звезд для диапазона параметров, характерных для массивных рентгеновских двойных систем с незначительным рентгеновским прогревом, маломассивных рентгеновских двойных систем с сильным рентгеновским прогревом и мас-

сивных рентгеновских двойных систем с очень сильным рентгеновским прогревом  $k_x \sim 10$ .

2. Исследовать влияние замены реальной приливно-деформированной фигуры звезды равнообъемной сферой или диском с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю на определение  $q$  по вращательному уширению спектральной линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$ . Получить аппроксимирующие формулы, позволяющие найти поправки  $\Delta q$  к приближенным значениям отношения масс  $q$ .
3. Исследовать величину вращательного уширения линий поглощения в спектре оптической звезды с величиной отношения масс  $q = M_x/M_v$  при различной мощности рентгеновского прогрева  $k_x$  на основании точных расчетов профиля линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$  в спектре оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы.
4. Уточнить массы оптических компонентов и черных дыр в рентгеновских новых с черными дырам по приведенной методике.
5. Исследовать устойчивость параметров нового общего распределения масс оптических компонентов и черных дыр по отношению к сильным единичным отклонениям от средних значений.

### **Научная новизна:**

1. Впервые разработан и применен метод использования К-поправок для полуамплитуд кривой лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных систем, в том числе с сильным рентгеновским прогревом  $k_x \sim 10$ . Приведенные таблицы К-поправок позволяют достаточно корректно учитывать эффекты близости компонентов в рассматриваемых системах, особенно при определении масс компонентов рентгеновских двойных систем с помощью метода Монте-Карло.
2. Впервые получены аппроксимирующие формулы, позволяющие скорректировать систематические ошибки, возникающие при замене реальной фигуры звезды равнообъемной сферой или диском с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю при определении отношения масс  $q$ . Эти формулы позволили существенно уточнить уже измеренные значения отношения масс  $q$



для маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами.

3. Впервые получены аппроксимирующие формулы, позволяющие учитывать эффекты взаимной близости при определении отношения масс  $q$  по величине вращательного уширения линий поглощения без прямого расчета искаженного эффектами взаимной близости профиля линии.
4. Было выполнено оригинальное моделирование общего распределения масс оптических компонентов и черных дыр в маломассивных рентгеновских двойных системах. Показано, что учет приливно-вращательной деформации фигуры звезды значительно увеличивает отношение масс компонентов  $q = M_x/M_v$  и уменьшает массу оптического компонента  $M_v$ . Масса черной дыры при этом изменяется незначительно. Полученное итоговое распределение масс оптических компонентов достигает максимума вблизи  $M_v \simeq 0.35M_\odot$ , что не согласуется с результатами популяционного синтеза в стандартной модели галактических рентгеновских транзиентов с черными дырами. Проанализированы различные модели происхождения и эволюции маломассивных рентгеновских двойных систем и высказаны идеи, позволяющие согласовать теорию с новыми результатами.
5. Впервые была показана устойчивость текущего наблюдаемого распределения плотности вероятности масс компактных объектов и “провала масс” относительно единичного засорения данных.

### **Практическая значимость.**

Представляет интерес подход использования К-поправок и аппроксимирующих формул, которые позволяют без использования расчетов в сложных моделях учитывать эффекты близости компонентов и заново оценивать параметры в рентгеновских двойных системах. Эти возможности особенно актуальны при определении параметров рентгеновских двойных систем методом Монте-Карло.

Полученный спектр масс звезд в рентгеновских новых с черными дырами хорошо согласуется со спектром масс, рассчитанным в предположении увеличения темпа потери массы звезды из-за прогрева излучением аккреционного диска. При увеличении темпа потери массы вследствие прогрева

рентгеновским излучением происходит неконсервативный обмен масс, при котором вещество звезды покидает двойную систему. Во время рентгеновской вспышки более 90 % вещества оптического спутника покидает двойную систему и лишь не более 10 % передается аккрецирующей черной дыре. Поэтому увеличение массы черной дыры в случае усиления аккреции, индуцированной рентгеновским прогревом, должно быть незначительным. Тем самым снимается противоречие с наблюдаемым бимодальным распределением масс компактных объектов. Стоит отметить, что звездное вещество, унесенное из системы индуцированным корональным ветром, должно формировать дисковую околозвездную оболочку вокруг системы, поскольку скорость ветра, по-видимому, недостаточна для того, чтобы ветер покинул двойную систему. Обнаружение таких облочечек - важная наблюдательная задача астрофизики рентгеновских двойных систем. Также возможно образование маломассивных рентгеновских систем с черными дырами в результате взаимодействия компонентов в тройной системе [27]. В процессе эволюции такой системы из-за механизма Козаи образуется объект Торна-Житков, в оболочке которого движется маломассивная звезда. Дальнейшая эволюция такой системы приводит к короткопериодической рентгеновской двойной системе с черной дырой и маломассивным оптическим компонентом.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод и результаты использования таблиц К-поправок к полуамплитудам кривых лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных системах.
2. Методика коррекции значений  $q$ , полученных в модели звезды, как равнообъемной сферы и модели звезды как диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю.
3. Методика построения аппроксимирующих формул на основе точных расчетов искаженного эффектами взаимной близости профиля линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$  в спектре оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы.
4. Результаты моделирование общего распределения масс оптических компонентов и черных дыр в маломассивных рентгеновских новых с черными дырами с учетом эффектов взаимной близости компо-

нентов, исправленных от погрешностей, возникающих при аппроксимации оптической звезды.

5. Результаты определения параметров и устойчивости общего распределения масс черных дыр методами непараметрической статистики с использованием генетического алгоритма.

### **Публикации по теме диссертации.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. В. С. Петров, А. В. Тутуков, А. М. Черепащук Об избытках светимостей О-В звезд в квазистационарных рентгеновских двойных системах, *Астрон. журн.*, 84, 2, 165 (2007)

2. В. С. Петров, Э. А. Антохина, А. М. Черепащук К-поправки кривых лучевых скоростей оптических компонентов рентгеновских двойных систем. Массивные системы с незначительным рентгеновским прогревом, *Астрон. журн.*, 90, 9, 729 (2013)

3. В. С. Петров, А. М. Черепащук, Е. А. Антохина Оценка устойчивости параметров распределения масс звездных черных дыр непараметрическими методами, *Астрон. журн.*, 91, 3, 167 (2014)

4. В. С. Петров, Э. А. Антохина, А. М. Черепащук Учет влияния эффектов близости на профили спектральных линий звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах, *Астрон. журн.*, 92, 386 (2015)

5. Э. А. Антохина, В.С. Петров, А.М. Черепащук Оценка точности методов определения масс компонентов для маломассивных рентгеновских двойных систем, *Астрон. журн.*, 94, 1, 1 (2017)

6. E. P. Pavlenko, Y. G. Kuznetsova, S. Yu. Shugarov, V. S. Petrov V404 Cyg: 10 years in quiescence, *Astrophysics and Space Science Supplement*, 276, 65 (2001)

- 6 — в тезисах докладов. Основные результаты работы докладывались на:

Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (ГАО РАН, г.Санкт-Петербург, 2013);

XX международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов - 2013” (МГУ, г. Москва, 2013);

Международная конференция “Звездные Атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля” (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2014);

Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов - 2014” (МГУ, г. Москва, 2013);

Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (ИКИ РАН, Москва, 2014);

Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (ИКИ РАН, Москва, 2015).

### **Личный вклад.**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем. В работе 1 автором построены зависимости “масса-светимость” и “радиус-светимость” для звезд в ТДС, находящихся на разных этапах эволюции. В работе 2 автором проведены расчеты К-поправок тремя алгоритмами при вариации параметров модельной задачи, а также построены таблицы К-поправок для 5 затменных рентгеновских пульсаров. В работе 3 соискателем получены результаты и написан текст. В работах 4 и 5 автором были произведены расчеты профилей линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$  в маломассивных рентгеновских двойных системах и рассчитаны поправки при определении отношения масс  $q$  в случае рентгеновского прогрева и модели звезды как диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю. В работе 6 соискателем были переопределены массы оптических компонентов и черных дыр. В работе 7 использованы наблюдения соискателя.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Всего в диссертации содержится 35 таблиц и 38 рисунков. Общий объем диссертации составляет 130 страниц. Библиография включает в себя 123 наименования.

## **Содержание работы**

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи

работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** работы содержит описание алгоритма построения теоретических кривых лучевых скоростей в модели Роша на основании синтеза профиля линии поглощения. Вычисление теоретических профилей абсорбционных линий и кривых лучевых скоростей оптических звезд в рентгеновских двойных системах выполнено с использованием двух алгоритмов. В Алгоритме I профиль абсорбционной линии и его эквивалентная ширина для каждой видимой площадки с температурой  $T_{loc}$  и локальным ускорением силы тяжести  $g_{loc}$  вычисляется по таблицам Куруца. В Алгоритме II локальный профиль линии для элементарной площадки вычисляется путем построения модели атмосферы в данной точке поверхности звезды. Спектр внешнего излучения компактного источника задается на основе данных рентгеновских наблюдений или модельной функцией. Приведена методика построения К-поправок, как отношение полуамплитуды кривой лучевых скоростей звезды в модели Роша к полуамплитуде кривой лучевых скоростей центра масс звезды

$$K_{corr} = K_v^{Roche} / K_v^c.$$

Были выполнены модельные расчеты значений К-поправок в зависимости от параметров  $q$  и  $\beta$ . Варьирование коэффициента гравитационного потемнения  $\beta$  дает возможность исследовать влияние распределения яркости по видимому диску звезды на лучевые скорости. Для модельных расчетов использовались три метода вычисления кривых лучевых скоростей: Алгоритм I [19], Алгоритм II [21], а также метод Вилсона и Софии [17].

Можно видеть, что значения К-поправок зависят от отношения масс  $q$ , и график “К-поправка -  $q$ ” имеет две характерные области.

В области  $q > 0.2$  значение К-поправки меньше 1 и монотонно убывает с уменьшением  $q$  до достижения минимума при  $q = q_{crit}$ . В этом случае величина полуамплитуды кривой лучевых скоростей звезды в модели Роша меньше, чем полуамплитуда кривой лучевых скоростей центра масс звезды ( $K_v^{Roche} < K_v^c$ ).

В области ( $q \sim 0.05 - 0.2$ ) значение К-поправки возрастает и может превысить 1. То есть при малых  $q$  полуамплитуда кривой лучевых скоростей звезды в модели Роша начинает возрастать и может стать больше, чем полу-

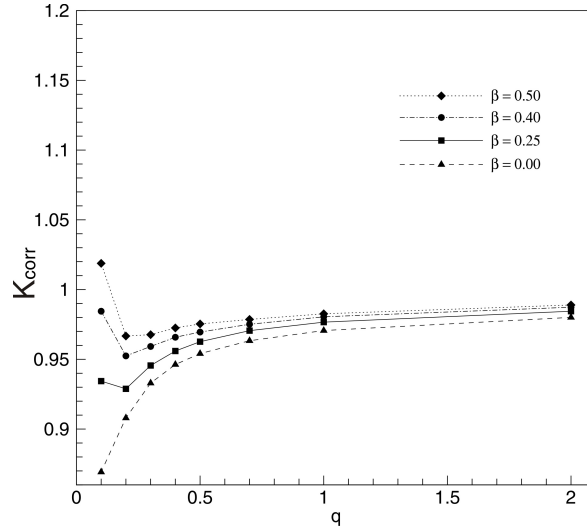


Рис. 1: К-поправки в зависимости от  $q$  при различных значениях коэффициента гравитационного потемнения  $\beta$ . Расчеты выполнены с Алгоритмом I [19] по линии  $H_\gamma$ .

амплитуда кривой лучевых скоростей центра масс звезды ( $K_v^{Roche} > K_v^{point}$ ). Отметим, что при  $q < 1$  центр масс системы находится внутри оптической звезды. Этот факт может быть существенен при рассмотрении систем с сильным рентгеновским прогревом. В этом случае кривые лучевых скоростей звезды могут заметно отличаться от кривых лучевых скоростей центра масс. Такое поведение К-поправок может быть объяснено изменением взаимного расположения центра масс системы, центра масс звезды и наиболее ярких областей формирования линии  $H_\gamma$  приливно-деформированной оптической звезды.

В случае сильно неоднородного распределения температуры ( $\beta = 0.5$ ) вклад более холодных областей на “носике” звезды мал и полуамплитуда кривой лучевых скоростей в модели Роша близка к полуамплитуде кривой лучевых скоростей в модели двух материальных точек.

Также рассмотрены зависимости “К-поправка -  $q$ ” при вариации угла наклона орбиты  $i$  и коэффициента заполнения полости Роша  $\mu$ .

Таким образом показано, что полуамплитуда кривой лучевых скоростей звезды в модели Роша и полуамплитуда кривой лучевых скоростей центра масс звезды могут существенно отличаться. Это отличие влияет на определение массы релятивистского компонента. Существование минимума К-поправок при  $q = q_{crit}$  позволяет оценить максимальную верхнюю ошибку определения массы в модели материальных точек. Построены таблицы К-поправок для массивных рентгеновских двойных систем с незначительным

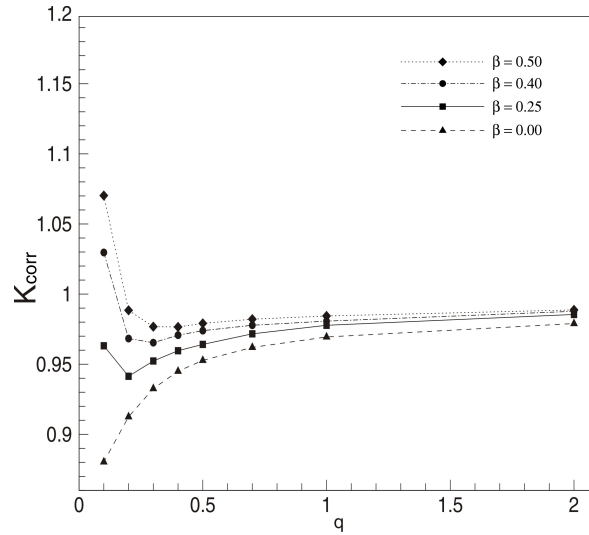


Рис. 2: К-поправки в зависимости от  $q$  при различных значениях коэффициента гравитационного потемнения  $\beta$ . Расчеты выполнены методом Вилсона и Софии [17].

рентгеновским прогревом, для маломассивных рентгеновских двойных систем с сильным рентгеновским прогревом и массивных двойных систем с очень сильным рентгеновским прогревом.

**В второй главе** оценено влияние систематических погрешностей при определении масс звезд в рентгеновских двойных системах по вращательному уширению абсорбционных линий в спектре звезды. Для этого были рассмотрены два приближенных метода определения отношения масс компонентов  $q = M_x/M_v$  в маломассивных рентгеновских двойных системах (при отсутствии рентгеновского прогрева). Первый метод основан на аппроксимации приливо-деформированной звезды в модели Роша сферой, объем которой равен объему полости Роша. При этом интегральный профиль линии поглощения, уширенный вращением, рассчитывался путем решения уравнения переноса излучения для каждой элементарной площадки на поверхности объемной фигуры сферической звезды. В этом случае локальный профиль линии поглощения сильно меняется от точки к точке по диску сферической звезды.

Показано, что при аппроксимации приливо-деформированной звезды в модели Роша равнообъемной сферой различие  $\Delta q$  между заданным и найденным  $q$  относительно невелики, и не превышают 10 %. При этом новое значение отношения масс  $q_{sph}$ , найденное при аппроксимации сферой, оказывается меньше заданного  $q$ , то есть отношение масс недооценивается.

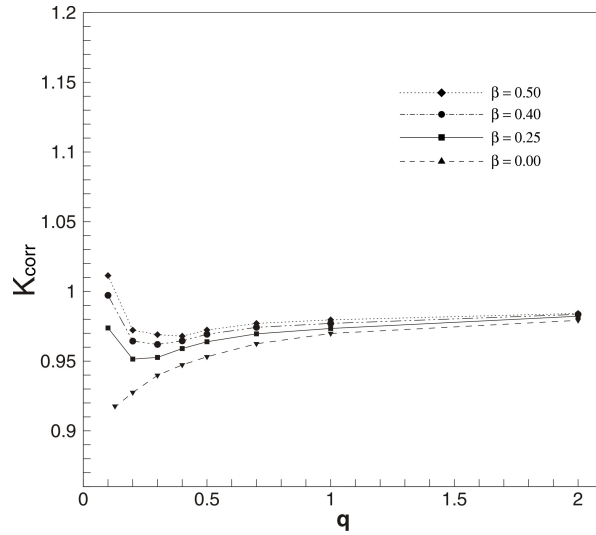


Рис. 3: К-поправки в зависимости от  $q$  при различных значениях коэффициента гравитационного потемнения  $\beta$ . Расчеты выполнены с Алгоритмом II [21] по линии  $H_\gamma$ .

Второй метод основан на более упрощенной модели: звезда в модели Роша аппроксимируется плоским круглым диском. Круг имеет потемнение к краю по линейному закону, а локальный профиль линии постоянен во всех точках диска. Такая модель соответствует модели классического вращательного уширения спектральных линий, которая широко применяется в звездной спектроскопии. Основное количество определений отношения масс компонентов  $q$  и масс черных дыр и оптических звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах выполнено разными авторами с использованием именно такой упрощенной модели.

Для этого приближения найденные значения  $q$  оказываются существенно меньшими, чем заданные значения  $q$  при расчетах теоретических профилей линии в спектре звезды в модели Роша. Так, при  $q \geq 30$  найденное в данном приближении  $q$  примерно в 1.5 раза меньше заранее заданного.

Таким образом, оба рассмотренных метода аппроксимации дают заниженные значения отношения масс  $q = M_x/M_v$ , причем это занижение особенно велико для наиболее широко используемой грубой модели звезды как диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю (см. рис. 5).

Следует подчеркнуть, что такое различие между точными и приближенными значениями  $q$  не удастся скомпенсировать изменением коэффициента потемнения к краю (см. рис. 6).



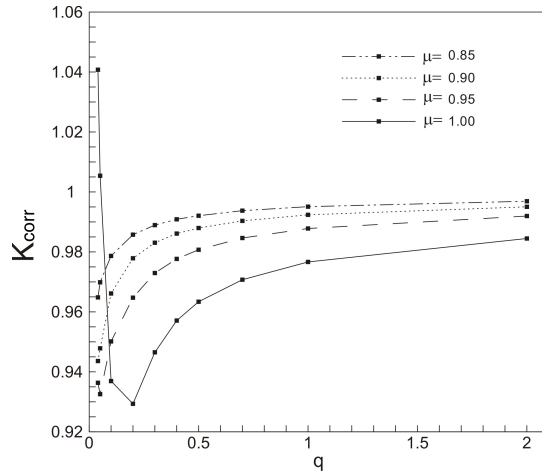


Рис. 4: К-поправки в зависимости от  $q$  при различных значениях степени заполнения полости Роша  $\mu$ . Расчеты выполнены с Алгоритмом I по линии  $H_\gamma$

Также приведены результаты точных расчетов искаженного эффектами взаимной близости профиля линии Ca I  $\lambda 6439 \text{ \AA}$  в спектре оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы. На основании этих расчетов получены аппроксимирующие формулы, которые связывают величину вращательного уширения линий поглощения в спектре оптической звезды с величиной отношения масс  $q = M_x/M_v$  при различной мощности рентгеновского прогрева  $k_x$ . Расчеты выполнены как для профилей линий на отдельных фазах орбитального периода, так и для профилей, усредненных по фазам. Исследовано влияние учета инструментального профиля на результаты определения  $q$  по величине  $V_{rot} \sin i$ .

В третьей главе приведены таблицы значений К-поправок для возможного диапазона параметров  $q$ ,  $\mu$ ,  $i$  для массивных рентгеновских двойных систем Cen X-3, LMC X-4, SMC X-1, Vela X-1, 4U 1538-52, Cyg X-1. На основании этих таблиц сделаны новые оценки полуамплитуды кривой лучевых скоростей и масс компактных объектов в этих системах. В главе показано, что для рассмотренных рентгеновских двойных систем массы нейтронных звезд, определенные из моделей с фиксированной полуамплитудой кривой лучевых скоростей, недооценены.

В четвертой главе уточнены оценки масс оптических компонентов и черных дыр для 9 маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами. Для каждой из этих рентгеновских систем различными авторами были получены качественные спектры оптических компонентов, которые позво-

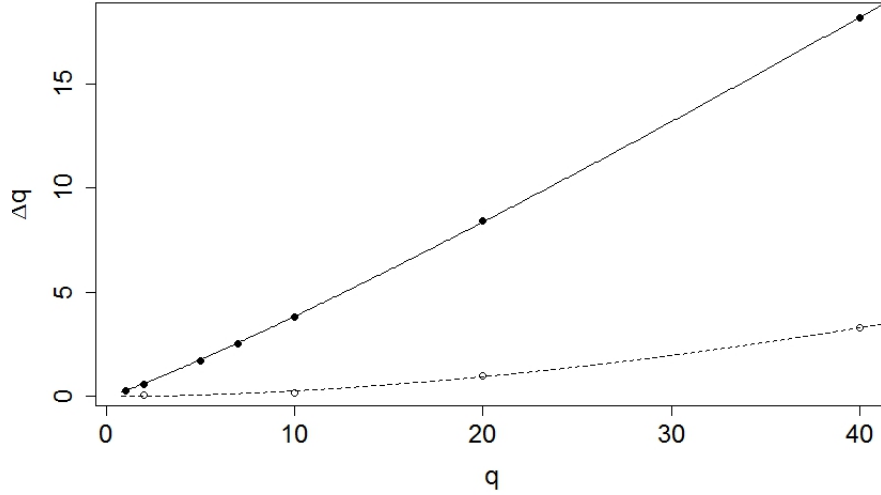


Рис. 5: Поправки  $\Delta q$  в зависимости от  $q$  (точное значение) для звезды в модели равнообъемной сферы (штриховая линия) и диска с постоянным абсорбционным профилем линии и линейным законом потемнения диска к краю (сплошная линия).

лили оценить вращательное уширение абсорбционных спектральных линий, оценить полуамплитуду кривых лучевых скоростей и наклонение орбиты. В данной главе выполнено уточнение отношения масс  $q = M_x/M_v$  на основании формулы:

$$\Delta q = (0.41 \pm 0.01) q_{disk}^{1.224 \pm 0.008}, \quad (1)$$

позволяющей скорректировать отношение масс  $q = M_x/M_v$  в двойной системе с учетом погрешности модели оптической звезды как  $q = q_{disk} + \Delta q$ . Выполнено моделирование общего распределения масс оптических компонентов и черных дыр в этих системах. Показано, что учет погрешности при определении  $V_{rot} \sin i$  в модели звезды как круглого диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю, значительно увеличивает отношение масс компонентов  $q = M_x/M_v$  и уменьшает массу оптического компонента  $M_v$ . Масса черной дыры при этом изменяется незначительно. Полученное итоговое распределение масс оптических компонентов достигает максимума вблизи  $M_v \simeq 0.35 M_\odot$ , а не  $0.6 M_\odot$ , как следует из мо-

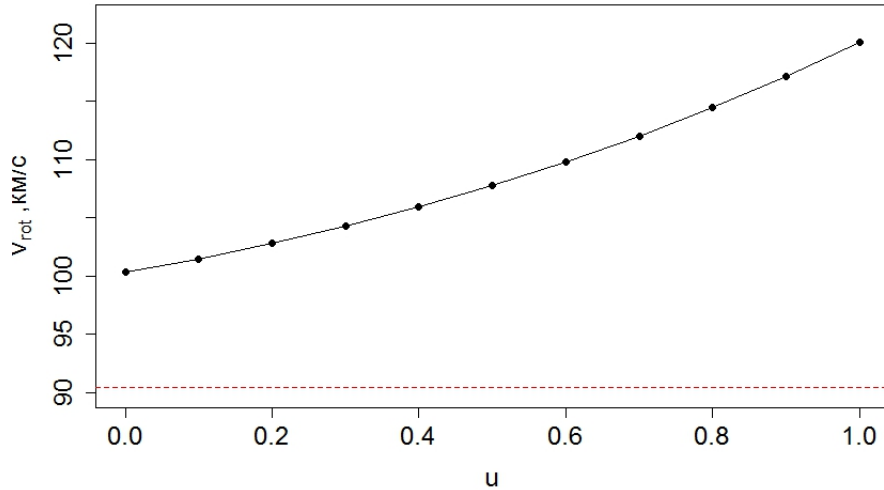


Рис. 6: Зависимость  $V_{rot} \sin i$  от линейного коэффициента потемнения к краю  $u$  при фиксированной  $FWHM = 3.685 \text{ \AA}$ . Пунктирная линия - значение  $V_{rot} = 90.41 \text{ км/с}$ , полученное для  $FWHM = 3.685 \text{ \AA}$  в модели звезды как равнообъемной сферы

дели звезды как круглого диска с постоянным локальным профилем линии и линейным законом потемнения диска к краю.

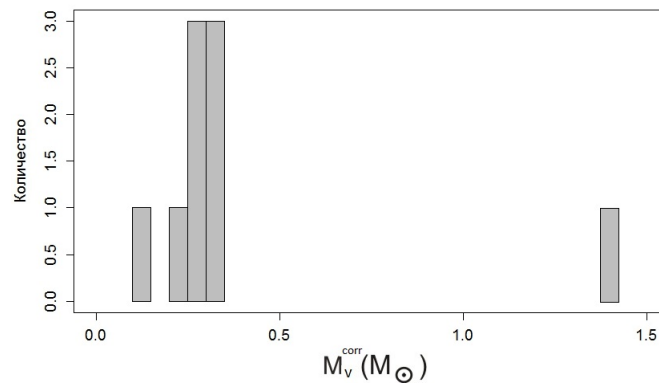


Рис. 7: Гистограмма распределения центральных значений массы 9 оптических компонентов в транзиентных рентгеновских двойных системах учетом приливо-вращательной деформации оптической звезды.

Современные эволюционные расчеты показывают, что средняя масса оптических компонентов маломассивной рентгеновской двойной системы должна быть не менее  $1 M_{\odot}$ . У звезды меньшей массы не хватит кинетической энергии орбитального движения, чтобы разбросать общую оболочку и обнажить двойную систему с черной дырой. Учитывая тепловую энергию об-

щей оболочки можно сформировать маломассивную рентгеновскую двойную систему с разумными параметрами, при этом оставаясь в рамках стандартного сценария эволюции с общей оболочкой. Черные дыры в таких системах должны формироваться из не очень массивных звезд ( $M < 28M_{\odot}$ ) в результате “тихого” коллапса гелиевых или углеродно-кислородных ядер звезд без феномена взрыва сверхновой и сброса оболочки (“failed supernovae”). Однако из наблюдений следует (см. например, что, как минимум, у двух маломассивных рентгеновских двойных систем (GRO J1655-40 и SAX J1819.3-2525) черные дыры образовались в результате “громкого” коллапса, сопровождающегося взрывом сверхновой и сбросом оболочки. В результате этого взрыва атмосфера маломассивного спутника оказалась обогащенной  $\alpha$ -элементами (O, Si, Mg и др.), которые не могли быть синтезированы в недрах маломассивной звезды.

Для объяснения этого противоречия высказывается гипотеза о неконсервативном обмене масс в системе. Такой режим может возникнуть в результате стимулированного рентгеновским прогревом истечения ветра от звезды. Также сделано предположение, что образование маломассивных рентгеновских системах с черными дырами происходит в результате взаимодействия компонентов в тройной системе (идея Эгглетона и Вербунта). В процессе эволюции такой системы из-за механизма Козаи образуется объект Торна-Житков, в оболочке которого движется маломассивная звезда. Дальнейшая эволюция такой системы приводит к короткопериодической рентгеновской двойной системе с черной дырой и маломассивным оптическим компонентом. В этой модели масса оптической звезды в маломассивной рентгеновской двойной системе с черной дырой может быть весьма малой, вплоть до  $0.1 M_{\odot}$  - значение, полученное в нашей работе.

В **пятой главе** построены индивидуальные распределения плотности вероятности масс компактных объектов для 20 рентгеновских двойных систем. При моделировании распределения масс компактных объектов использовался метод Монте-Карло.

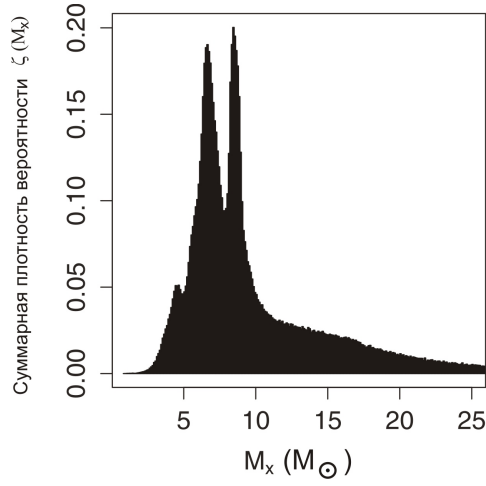


Рис. 8: Суммарная плотность вероятности  $\zeta(M_x)$  распределения масс компактных объектов  $M_x$  в 20-ти рентгеновских двойных системах. Минимум в диапазоне  $M_x \simeq 8 M_\odot$  статистически незначим.

Предполагается, что теоретическая плотность вероятности распределения масс компактных объектов  $M$  имеет вид:

$$\varphi(M) = \begin{cases} CM^{-(\alpha+1)} & \text{если } M > M_{min} \\ 0 & \text{если } M < M_{min} \end{cases}$$

где  $C = \alpha M_{min}^\alpha$  - множитель, нормирующий на единицу интеграл от плотности вероятности. Целью исследования является определение таких значений параметров  $M_{min}$  и  $\alpha$ , при которых теоретическое распределение  $\varphi(M)$  соответствует наблюдаемому распределению  $\zeta(M)$ .

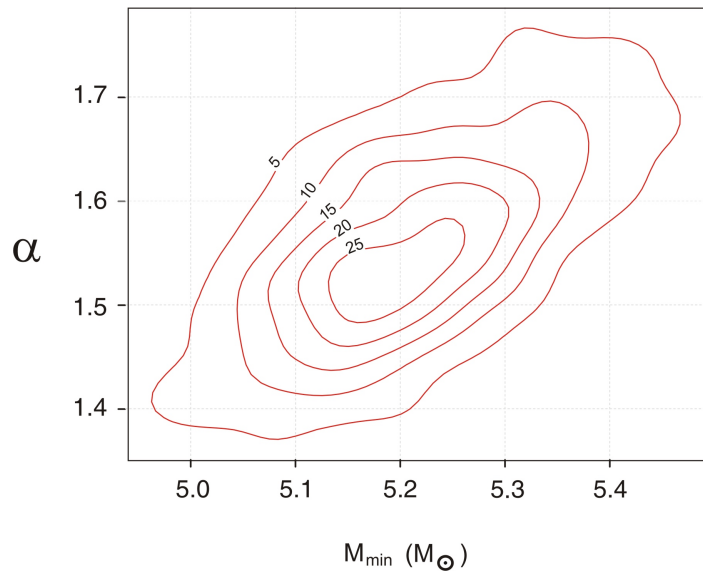


Рис. 9: Двумерное распределение параметров  $M_{min}$ ,  $\alpha$ .

Получены параметры итогового распределения масс черных дыр методами непараметрической статистики. Подтверждена статистическая значимость наличия “провала масс” черных дыр в диапазоне  $3-5 M_{\odot}$ .

Показана устойчивость текущего наблюдаемого распределения плотности вероятности масс компактных объектов относительно единичного засорения данных.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан и применен метод использования К-поправок для полуамплитуд кривых лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных системах. Приведенные таблицы К-поправок помогут достаточно корректно учитывать эффекты близости компонентов в рассматриваемых системах, особенно при определении масс компонентов рентгеновских двойных систем с помощью метода Монте-Карло. В методе Монте-Карло для определения масс оптической звезды и релятивистского объекта обычно применяется модель двух материальных точек, и наблюдаемая величина  $K_v$  должна корректироваться за эффекты эллипсоидальности и “отражения”. При переборе по параметрам  $q$ ,  $\mu$ ,  $i$  каждому набору этих параметров будет соответствовать свой корректирующий множитель. Таким образом, на каждом шаге итерации в методе Монте-Карло следует использовать свою величину “наблюдаемой” полуамплитуды кривой лучевых скоростей оптической звезды.
2. Исследования влияния широко используемых многими авторами упрощающих предположений о фигуре звезды на определение отношения масс  $q$  показали, что массы оптических компонентов в мало-массивных рентгеновских двойных системах, определенные в рамках модели звезды, как диска с постоянным локальным профилем по диску и линейным законом потемнения к краю, имеют систематическую недооценку. Получены аппроксимирующие формулы, позволяющие найти поправки  $\Delta q$  к приближенным значениям отношения масс  $q$ .
3. Получены аппроксимирующие формулы, которые связывают величину вращательного уширения линий поглощения в спектре опти-

ческой звезды с величиной отношения масс  $q = M_x/M_v$  по величине  $V_{rot} \sin i$  при различной мощности рентгеновского прогрева  $k_x$ . Расчеты выполнены как для профилей линий на отдельных фазах орбитального периода, так и для профилей, усредненных по фазам.

4. Показана устойчивость текущего наблюдаемого распределения плотности вероятности масс компактных объектов и “провала масс” относительно единичного засорения данных

## Основные публикации по теме диссертации

- [1] V. Kalogera, G. Baym // *Astrophys. J.* 1996 V. 470. P. L61.
- [2] C. D. Bailyn, R. K. Jain, P. Coppi, J. A. Orosz // *Astrophys. J.* 1998 V.499. P. 367.
- [3] A. M. Cherepashchuk, Proc. Intl. Conf. in Honor of Prof. A. G. Masevitch: Modern Problems of Stellar Evolution, Ed. by D. S. Wiebe (Zvenigorod-Moscow, 1998), p. 198.
- [4] F. Özel, D. Psaltis, R. Narayan and J. E. McClintock // *Astrophys. J.* 2010 V.725. P. 1918.
- [5] W. M. Farr, N. Sravan, A. Cantrell, et al. // *Astrophys. J.* 2011 V.741. P.103.
- [6] К.А. Постнов, А.М. Черепащук // *Астрон. журн.* 2003 Т.80. С.1075.
- [7] G. E. Brown // *AIPC*, 556, 68B (2001)
- [8] C. L. Fryer, K. Belczynski, G. Wiktorowicz, et al. // *Astrophys. J.* 2012 V.749. P.91.
- [9] L. Kreidberg, C. Bailyn, W. Farr and V. Kalogera // *Astrophys. J.* 2012 V.757. P.36.
- [10] В. С. Петров, А. М. Черепащук, Е. А. Антохина // *Астрон. журн.* 2014 Т. 91. С.167.
- [11] P. Podsiadlowski, N. Ivanova, S. Justham, S. Rappaport // *MNRAS* 2010 V.406. P.840.
- [12] T. E. Stern // *Proc Nat Acad Sci.* 1941 V.27. P.168.
- [13] Z. Kopal // *Proc. Am. Phil. Soc.* 1945 V.89. P.57.
- [14] Z. Kopal, *Close Binary Systems* (New York: Wiley, 1959).
- [15] Z. Kopal M. Kitamura // *Adv. Astr. And Ap.* 1968 V.6. P.125.
- [16] Hutchings // *Astrophys. J.* 1977 V.217. P.537.



- [17] R. E. Wilson and S. Sofia // *Astrophys. J.* 1976 V.203. P.182.
- [18] R. E. Wilson, and E.J. Devinney // *Astrophys. J.* 1971 V.166. P.605.
- [19] Э. А. Антохина, А.М. Черепащук // *Астрон. журн.* 1994 Т.71. С.420.
- [20] R. L. Kuruz, CD-ROMs (1992).
- [21] Э. А. Антохина, А.М. Черепащук, В.В. Шиманский // *Астрон. журн.* 2005 Т.82. С.131.
- [22] R.A. Wade K. Horne // *Astrophys. J.* 1988 V.324. P.411.
- [23] Marsh T.R., Robinson E.L., Wood J. H.// *MNRAS* 1994 V.266. P.137.
- [24] T. Shahbaz // *MNRAS* 2003 V.339. P.1031.
- [25] G.W. Collins II, R. J. Truax // *Astrophys. J.* 1995 V.439. P.860 .
- [26] Э. А. Антохина, А. М. Черепащук // *Письма в “Астрон. журн.”* 1997 Т.23. С.889.
- [27] P. P. Eggleton, F. Verbunt // *MNRAS* 1986 V.220. P.13.